



## Régénération des filtres à particules (FAP) : étude expérimentale et numérique

Arnaud Beurotte, Michel Boussuge, Laurent Jeanfaivre, Sylvain Gailliègue

### ► To cite this version:

Arnaud Beurotte, Michel Boussuge, Laurent Jeanfaivre, Sylvain Gailliègue. Régénération des filtres à particules (FAP) : étude expérimentale et numérique. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 5 p. hal-00570473

**HAL Id: hal-00570473**

**<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00570473>**

Submitted on 1 Mar 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Régénération des filtres à particules (FAP) : étude expérimentale et numérique

A. Beurotte, M. Boussuge, L. Jeanfaivre, S. Gaillière

MINES ParisTech, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry Cedex, France

### RESUME:

Les structures nid d'abeilles en céramique, qui constituent les filtres à particules (FAP) utilisés dans les véhicules particuliers, sont soumises à de forts gradients thermiques lors de la phase de combustion des suies, dite de régénération. Des gradients trop élevés peuvent conduire à une fissuration du filtre, nuisible à son efficacité. L'essai présenté ici permet d'analyser les causes de la fissuration d'un barreau élémentaire (nid d'abeilles en carbure de silicium) composant le FAP. Les gradients thermiques sont générés à l'aide de fils résistifs introduits au sein des canaux du nid d'abeilles. Les contraintes induites par ces gradients sont déterminées par simulation numérique (calcul par éléments finis). Le lieu et l'instant d'amorçage des fissures peuvent ainsi être associés à un champ de contraintes calculé dans le barreau.

**MOTS-CLES :** filtre à particules, nid d'abeilles, carbure de silicium, contraintes d'origine thermique

Le filtre à particules (FAP), garant du respect des normes Euro au sens de la réduction des émissions de particules (en mg/km), est réalisé à partir d'une structure en nid d'abeilles de type « wall-flow » (fig. 1). Cette configuration du nid d'abeilles permet, en obstruant un canal sur deux, de créer un chemin de filtration pour les gaz, en les forçant à traverser les parois poreuses des canaux. La porosité ouverte est ajustée en optimisant les paramètres de frittage des modules de SiC.

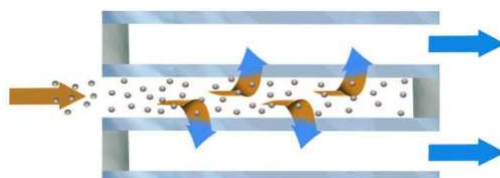


Figure 1 – Principe de filtration wall-flow

La structure de base du filtre (nid d'abeilles à section carrée) est obtenue par extrusion d'une pâte thermoplastique chargée de grains de carbure de silicium (SiC). Le profil extrudé est alors séché puis fritté. Un coulis de liaison permet par la suite l'assemblage de ces profils pour obtenir le filtre complet (à section circulaire, elliptique ou autre).

Au cours de l'utilisation du moteur, les particules produites par une combustion imparfaite des gaz s'accumulent sur les parois du filtre, provoquant une augmentation de la chute de pression (perte de charge) à la traversée du filtre et une diminution des performances du moteur. Afin d'éviter une trop importante perte de puissance ainsi qu'une consommation excessive, les particules sont brûlées tous les 400-500 km. C'est la phase dite de régénération.

Les températures atteintes pendant cette opération peuvent fortement augmenter, en raison du caractère exothermique de la réaction d'oxydation des suies, notamment si la vitesse des gaz ne permet pas le refroidissement du filtre (moteur arrêté ou au ralenti pendant la régénération). Des élévations trop brutales de température peuvent conduire à un endommagement du filtre.

Ces gradients induits représentent dès lors la grandeur de dimensionnement du FAP. Un essai dit "de régénération sévère", représentant la situation de vie la plus contraignante pour le FAP, est utilisé pour valider la tenue du FAP en clientèle. Le gradient maximal admissible avant fissuration est caractérisé par une masse limite en suie (MLS) stockée dans le FAP avant régénération.

Dans l'optique d'améliorer la durabilité des filtres et d'en réduire les coûts de fonctionnement, une analyse des phénomènes d'endommagement de la structure en céramique pendant cette phase de régénération a été initiée dans le cadre du programme DuraFAP.

Ce document présente un essai spécialement développé pour introduire des gradients thermiques paramétrables et sans banc moteur dans des barreaux constitutifs de FAP et générer un endommagement semblable à celui observé sur certains FAP en retour clientèle.

### Présentation du système

Le système expérimental est composé de quatre fils résistifs en alliage « Kanthal » introduits au sein de quatre canaux centraux dans le barreau nid d'abeilles. Ces fils sont alimentés par l'intermédiaire d'un transformateur électrique en courant alternatif. La régulation est réalisée en puissance, elle est obtenue par la multiplication des courant et tension efficaces délivrés par le transformateur.

Le barreau est placé à l'air libre. Son orientation à 45° par rapport à l'horizontale permet de minimiser l'asymétrie dans le champ de température causée par le phénomène de convection libre.

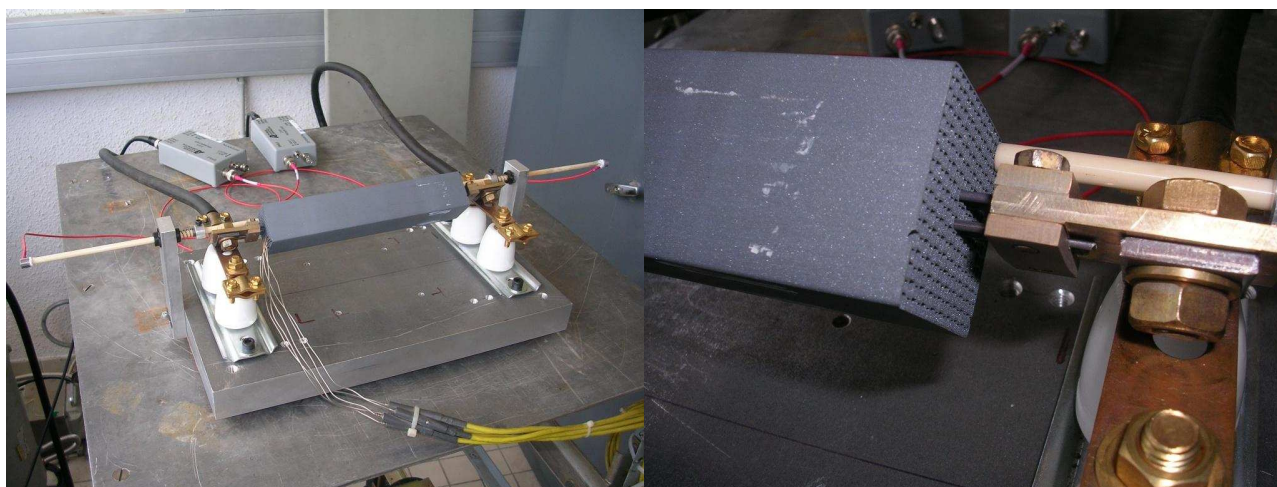


Figure 2 – Dispositif expérimental

Les températures sont mesurées au sein du nid d'abeilles par l'intermédiaire de plusieurs thermocouples introduits dans les canaux. Un dispositif d'émission acoustique est utilisé pour déterminer les instants et les lieux d'apparition des fissures dans la structure.

### Détermination des propriétés thermiques du nid d'abeilles

Un premier essai a consisté à réaliser plusieurs paliers de puissance afin d'obtenir des champs de températures stabilisés (régimes thermiques stationnaires à différents flux).

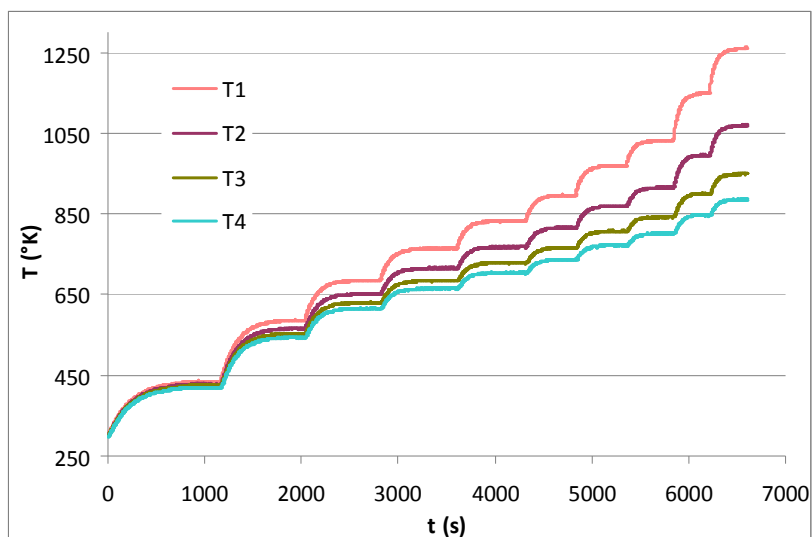


Figure 3 – Evolution des températures dans la diagonale du barreau pour plusieurs paliers de puissance

Les mesures expérimentales de température à l'aide de plusieurs thermocouples introduits dans les canaux du nid d'abeilles ont prouvé l'axisymétrie de la distribution du champ de température dans la section ; la température ne dépend que de la distance au centre du barreau (figure 4). On en déduit que la diffusion de la chaleur dans notre système se fait de manière isotrope transverse : l'orthotropie de la géométrie extérieure et de la structure interne du barreau n'affectent pas de manière significative cette isotropie.

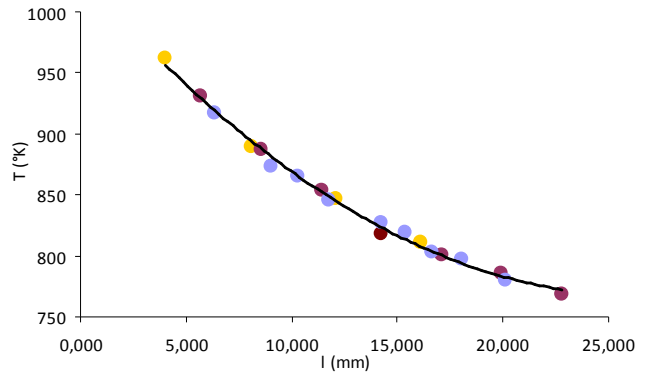
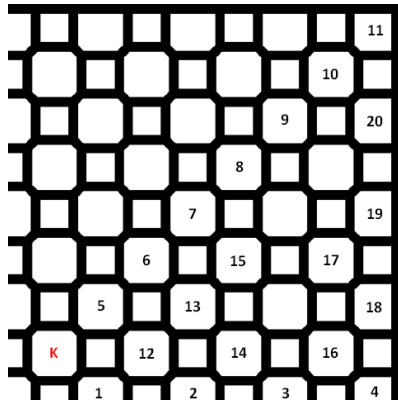


Figure 4 – Position des thermocouples (à gauche) et températures mesurées en fonction de leur distance au centre toutes directions confondues (à droite)

Pour déterminer les contraintes par simulation par éléments finis, il est nécessaire de connaître le champ de température dans la structure sollicitée thermiquement. On utilise pour cela une simulation thermique permettant de calculer les températures à partir de la puissance introduite. Les propriétés thermiques du matériau homogène équivalent au barreau, conductivité et capacité thermiques apparentes, sont déterminées par méthode inverse en ajustant le champ de température calculé sur celui mesuré expérimentalement, dans les phases transitoires et stationnaires associées aux montées successives en paliers de puissance.

Le calcul est réalisé en 2D sur un quart de section en raison des symétries du système. La section est maillée de telle sorte à faire correspondre à chaque nœud un canal du nid d'abeilles (figure 5). Un flux volumique de chaleur, correspondant à la puissance électrique introduite, est appliqué sur l'élément représentant le fil résistif, en rouge sur la figure 5. Le contour extérieur de la section est supposé en échange convectif libre avec l'air ambiant.

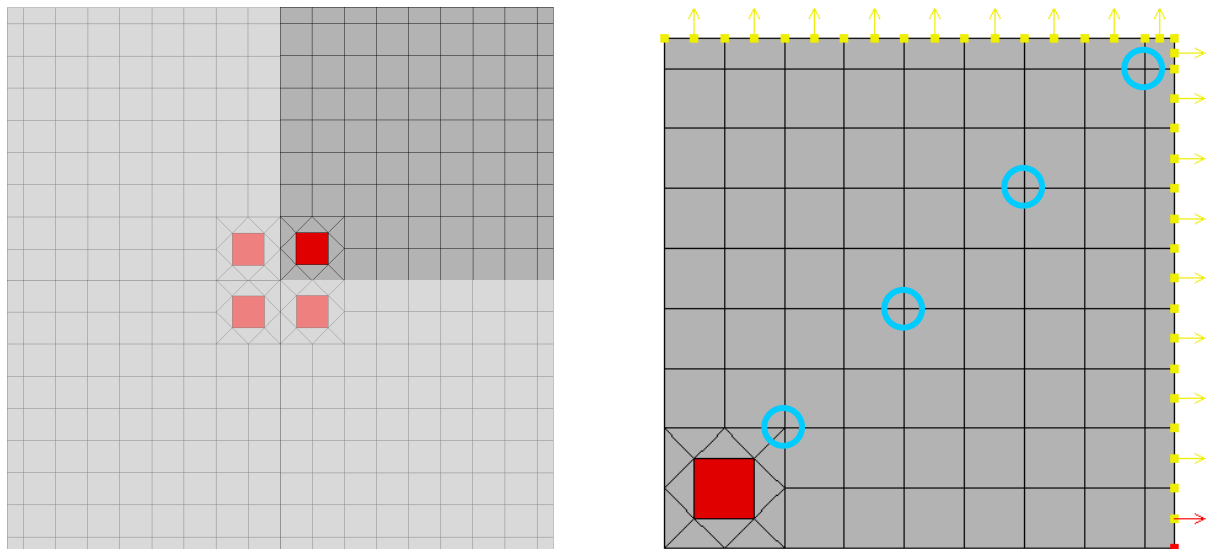


Figure 5 – Maillage du quart de la section du nid d'abeilles : en rouge, l'élément représentant le fil résistif, en bleu, les nœuds correspondant à la position des quatre thermocouples de référence, en jaune, le contour soumis à un flux convectif

Le coefficient de convection peut être calculé analytiquement à partir des mesures expérimentales sur le nid d'abeilles. Le flux convectif est défini par :

$$d\Phi = h(T - T_{20^{\circ}\text{C}})dS$$

En régime stabilisé, si l'on néglige les perturbations induites par les extrémités du barreau, le flux sortant sur tout le contour (flux convectif) est égal au flux entrant (puissance dissipée par les fils).

$$P_{fil} = h(T - T_{20^{\circ}C})S_{contour}$$

$$h = \frac{P_{fil}}{(T - T_{20^{\circ}C})S_{contour}}$$

La température T correspond à la moyenne de deux thermocouples situés au plus proche de la surface externe, en coin et milieu de face (thermocouples 4 et 11 sur la figure 4). En régime stationnaire, la puissance dissipée par la surface externe étant égale à celle fournie par les résistances et donc connue, le coefficient de convection peut être calculé. Son évolution en fonction de la température est représentée en figure 6.

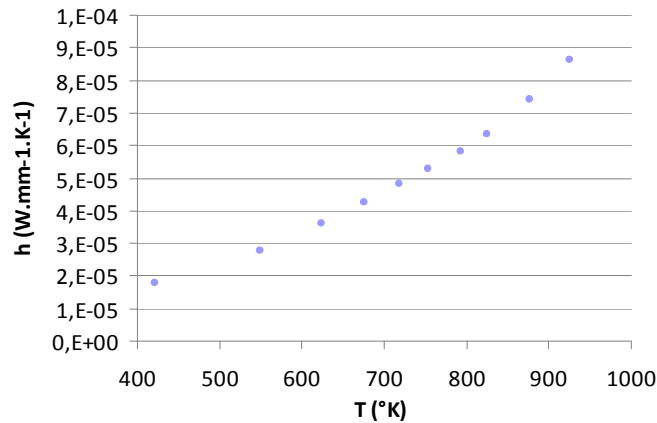


Figure 6 – Coefficient de convection libre périphérique entre le SiC et l'air en fonction de la température

La conductivité du matériau homogène équivalent est déterminée par méthode inverse en comparant les températures de quatre nœuds de référence du maillage aux mesures expérimentales sur le nid d'abeilles pour plusieurs états stationnaires. Le résultat de l'optimisation est présenté sur la figure 7 en fonction de la température moyenne dans la section.

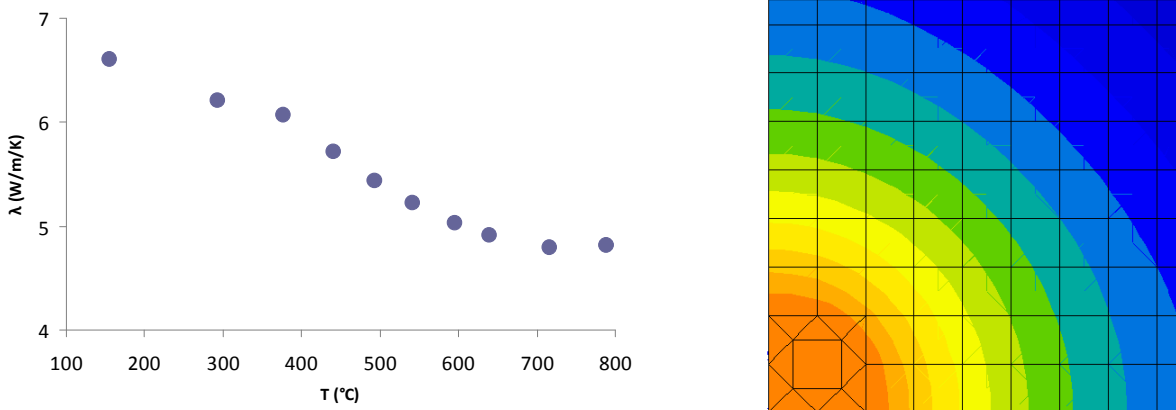


Figure 7 – Conductivité thermique apparente du matériau homogène équivalent en fonction de la température et distribution de température dans un quart de section du barreau

Cette conductivité est une conductivité apparente, qui intègre non seulement les transferts thermiques par conduction dans le SiC poreux, mais également par conduction et convection dans l'air des cellules, et par rayonnement. Pour s'assurer de la pertinence de la valeur estimée, la conductivité apparente du SiC poreux constituant le nid d'abeilles, qui demeure le principal mode de transfert thermique, a été estimée analytiquement. A partir de la conductivité thermique du SiC dense (de l'ordre de  $100 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), on peut, par exemple, déterminer la conductivité du SiC poreux par un modèle analytique issu de la théorie de percolation du milieu effectif [Landauer 1952].

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{4} \left[ \lambda_S (3v_S - 1) + \lambda_A (3v_A - 1) + \left( [\lambda_S (3v_S - 1) + \lambda_A (3v_A - 1)]^2 + 8\lambda_A \lambda_S \right)^{1/2} \right]$$

On obtient une conductivité à l'ambiante de  $40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour le SiC poreux. A l'échelle supérieure, en considérant les canaux comme des inclusions d'air dans une matrice de SiC poreux, on utilise ensuite la borne supérieure de l'estimation de Hashin et Shtrikman [Hashin 1962] pour approcher la valeur du matériau homogène équivalent à la structure nid d'abeilles. Celle-ci vaut  $10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à l'ambiante et se trouve donc dans l'ordre de grandeur des valeurs présentées sur la figure 7.

La conductivité axiale, dans la direction d'extrusion du barreau, peut être calculée simplement à partir de l'estimation de la conductivité du SiC poreux des membranes et du rapport de section du nid d'abeilles.

Des valeurs de la capacité thermique massique du SiC ont été rapportées dans de nombreuses publications [Snead 2007] : elles sont généralement comprises entre  $650$  et  $700 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à l'ambiante. Une identification par méthode inverse sur les phases transitoires de montée en température permet d'obtenir une estimation de cette valeur dans notre cas à  $735 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

## Références

[Hashin 1962] Hashin, Z. & Shtrikman, S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. Journal of Applied Physics, 1962, 33, 3125-3131.

[Landauer 1952] Landauer, R., The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures. Journal of Applied Physics, 1952, 21, 779-784.

[Snead 2007] Snead, L.L., Nozawa, T., Katoh, Y. & al., Handbook of SiC properties for fuel performance modelling. Journal of Nuclear Materials, 2007, 371, 329-377.

## Remerciements

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet d'études DuraFAP financé par l'ANR sous la tutelle de l'ADEME regroupant plusieurs entreprises (PSA, Faurecia, Saint-Gobain) et laboratoires universitaires (Centre des Matériaux de MINES-ParisTech à Evry et Crismat à Caen).